第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

芦芽山华北落叶松早晚材径向生长对气候变化响应的分离效应

郭伊利[1,2]， 李书恒[1,2]， 王嘉川[1,2]， 韩宜洁[1,2]

（1. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127；
2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127）

摘 要： 利用采自芦芽山3个海拔高度的华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）年轮样芯建立树轮差值年表，采用树轮气候学的方法，以1984年/1985年为界，将树木整轮、早材和晚材差值年表与气候要素进行相关分析，探讨不同海拔华北落叶松径向生长对气候因子的响应，在1957—1984年和1985—2020年2个时段的异质性特征。结果显示：（1）芦芽山3个海拔树木早材和晚材径向生长变化在1957—2020年与研究区的气候变暖趋势难以拟合，与气温因子的响应发生了分离。（2）在1957—1984年，低海拔早材生长与气候因子未表现出显著的相关关系，生长季降水因子（6月降水量）对中高海拔早材生长具有明显的限制作用；进入1985—2020年，生长季降水因子（4月降水量）对低海拔早材的生长影响增强，中高海拔早材生长主要与1月降水量显著正相关，即生长季气候因子对中高海拔早材的生长限制作用减弱。（3）生长前养分积累对研究区华北落叶松树木晚材的生长至关重要：在1957—1984年，低海拔与中高海拔晚材宽度年表均与5月降水量呈显著正相关关系；在1985—2020年，树木晚材径向生长表现出与生长前气候因子（上一年11月，当年1月、3月、5月）的显著相关关系。（4）2个不同的时段内，低海拔早材生长模式的改变可能是气温升高带来的干旱胁迫造成的；而中高海拔早材生长模式差异有可能是由于气温升高缓解了中高海拔地区低温对早材生长的抑制作用。综上所述，随着全球气候变暖，芦芽山3个海拔华北落叶松树木早材和晚材生长在2个时段对于气候要素的响应特征、响应模式存在差异，与气候因子响应存在一定的"分离"现象，在今后区域气候重建工作中应考虑该地区树木生长的分离现象，保证重建工作的可靠性。

关键词： 芦芽山；华北落叶松；海拔梯度；早材年轮宽度；晚材年轮宽度；气候变化；分离效应

气候变化影响森林的生态结构和功能[1-2]，生长在中高纬度以及高海拔地区的树木对气候变化更加敏感[3-4]。树木生长分离效应是指在全球气候变暖的大趋势下，生长在北半球高纬度地区那些原本受温度因子限制作用的树木，对温度的敏感性有所下降，也就是说树木的生长与全球气候变暖趋势在区域尺度上难以拟合[5]。自Jacoby等[5]于1995年首次发现树木生长与气候因子响应的分离现象，国内外关于树木-气候的分离问题取得了大量的研究成果[6-10]。William等[6]发现，阿拉斯加克拉湖国家公园保护区树木生长与气候因子的响应在1950年之后发生了分离；郭明明等[8]研究发现，处于中纬度的川西地区气温突变后，马尔康地区的树木生长与气候因子存在"响应分离"。一方面，树木生长"分离现象"对树木生长与气候响应的一致性原则提出了质疑，其研究对于气候重建工作的可靠性至关重要。另外，在全球气候变暖的背景下，深入探究森林生态系统的气候响应，才能更加科学认识其在全球碳循环中的地位和作用。目前，关于树木生长分离现象的研究集中在北半球，特别是北半球的高纬度地区，但是对于中低纬度地区树木生长的分离效应研究比较少[11]。为更加深入地探究树木生长分离现象发生的时空格局，必须在更加广泛的地区，特别是中低纬度地区开展类似的研究。已有许多

收稿日期： 2022-04-02； **修订日期：** 2022-06-13
基金项目： 国家林业公益性行业科研专项（201304309）；陕西省自然科学基金项目（2014JQ5172）；黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目（SKLLQG1611）
作者简介： 郭伊利（1998-），女，硕士研究生，主要从事气候变化研究. E-mail: GuoYili2021@163.com
通讯作者： 李书恒. E-mail: lish@nwu.edu.cn

研究表明,分离早晚材能够提取到更强或者响应不同的气候信号[12-14]。树轮早晚材研究主要在年轮宽度以及稳定同位素[15-18]等方面,Zhao等[12]研究分析,长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*)树轮晚材宽度年表与气候因子的响应,结果发现调整晚材宽度年表与7—8月气候因子的响应强烈,并在此基础上重建了中国南方近126 a的SPEI值。

处于中纬度地带的山西芦芽山,位于中国华北地区,该地区自20世纪80年代开始升温[19]。气候变暖导致气候因子对分布在芦芽山低海拔白杆(*Picea meyeri*)的生长影响增强,而对高海拔白杆的生长影响减弱[20]。对该地区华北落叶松整轮年轮宽度与气候变暖的响应已有研究[21-22],但是关于芦芽山华北落叶松树轮早材、晚材宽度指标对气候变化的响应问题涉及较少,该研究区树木早晚材生长与气候的响应是否发生了分离?气候变化又是如何影响树木早材和晚材的生长?本文通过独立样本*t*检验方法,分析芦芽山气候因子的年际变化趋势,发现在1984年后芦芽山温度快速升高,基于此以1984年/1985年为分界点,探讨树木生长-气候响应的分离现象以及气候变化对树木早材和晚材生长的影响。本研究对全球气候变暖趋势下华北地区的森林动态研究与森林管理具有一定的参考价值。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

管涔山主峰芦芽山(38°35′~38°45′N,111°50′~112°05′E)是山西省北部的主要山峰之一,位于吕梁山脉北端,恢河与汾河的源头,处于宁武、岢岚、五寨等县的交界地,其最高峰荷叶坪海拔为2783 m,山体由东北向西南斜向延伸,地势高峻,成为东亚夏季风深入内地的天然屏障,其间经历了降水量骤减的过程,处于暖温带半湿润区,受蒙古高原气候的影响,具有明显的大陆性气候特点,夏季凉爽多雨,冬季寒冷干燥,气象灾害主要有霜冻,部分地区春旱较为严重[23]。芦芽山植被与土壤垂直更替明显,随海拔升高,植被依次为:森林草原带(1300~1500 m)、落叶阔叶林带(1350~1700 m)、针阔叶混交林带(1700~1850 m)、寒温性针叶林带(1750~2600 m)和亚高山灌丛草甸带(2450~2772 m),其中华北落叶松主要分布于寒温性针叶林带内;土壤类型自下而上依次为:山地褐土、山地淋溶褐土、棕色森林土和亚高山草甸土[24]。研究区气象站及采样点分布情况见图1。

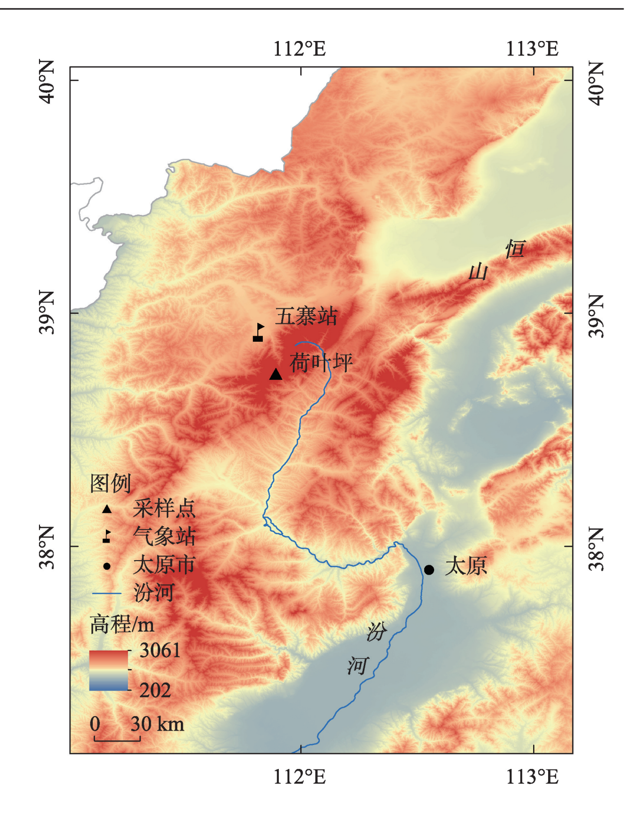


图1　气象站和采样点分布

Fig. 1　Distribution of meteorological station and tree-ring sample sites

1.2　气候资料

本研究气象数据来源于中国气象数据网(www.http//data.cma.cn),选取距离采样点最近的五寨气象台站(38°55′N,111°49′E,海拔1401.0 m,数据自1957年起测定)的气象数据作为本研究气象资料来源;研究区年平均气温为5.3 ℃,7月温度最高20.1 ℃,1月温度最低-12.4 ℃,年降水量470.7 mm,全年6—9月降水较多,约占全年降水的75%,7月降水最多113.8 mm,总体呈现出雨热同期的特征(图2)。研究时段为1957—2020年,气候指标主要选取月平均气温与月降水量。

1.3　样本采集

样本的采集与处理严格按照国际树木年轮数据库(ITRDB)的标准进行[25],2021年7月14日在山西省芦芽山主峰荷叶坪设立3个采样点(表1);研究区华北落叶松分布下限位于2050 m,野外考察后发现该海拔的华北落叶松树龄过短,幼龄效应明显,因此本文使用2303 m的采样点作为最低海拔采样

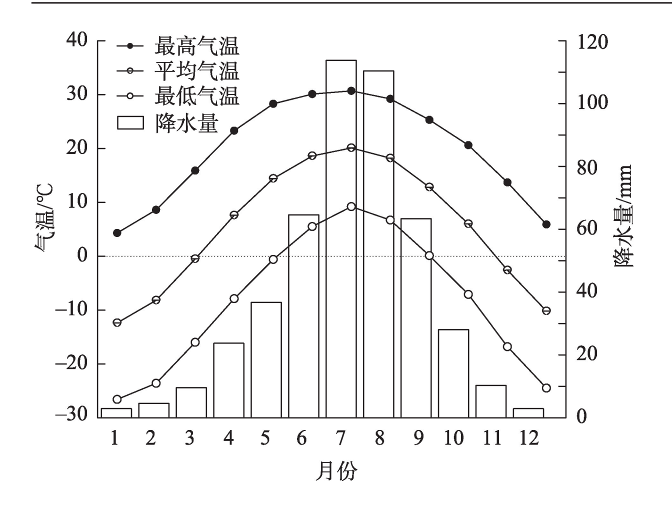


图2 1957—2020年研究区平均降水量

Fig. 2 Average temperature and precipitation in the study area from 1957 to 2020

点进行研究,此外高海拔采样点HYP3位于华北落叶松的分布上限,为天然林线;在每个采样点使用内径为5.15 mm的树木年轮生长锥采集受人为影响较小且未受过火灾、虫害等生长环境相对稳定的华北落叶松20~24株,每株钻取2个树芯,分别在每棵树的胸径和基部各钻取1个样芯。

1.4 年表建立

所有样品装入纸筒带回实验室,经过风干、打磨以及交叉定年后,采用精度为0.01 mm的LINTAB轮宽分析仪器分别精确测量样品的整轮宽度、早材宽度与晚材宽度,大部分样芯的早晚材之间界线分明(图3),因此直接依据突变界限区分,对于个别存在早晚材过渡段的样芯,通过显微镜放大,将过渡段的一半处作为两者之间的界线[26]。定年质量的检验通过国际树轮数据库提供的COFECHA软件[27]完成,最终在每个采样点选取38个生长状况良好且相关度较高的样芯参与本次研究,利用ARSTAN程序,采用负指数函数去除序列生长趋势,由于中海拔与高海拔差距较小,且已有研究表明,研究区中高海拔具有相同的生长模式[22],因此本文分别制作低海拔与中高海拔采样点共计6个树轮宽度年表,即低海拔整轮、早材与晚材宽度年表RW1、EW1与LW1;中高海拔整轮、早材与晚材宽度年表RW2、EW2与LW2,并计算信噪比(SNR)、平均敏感度(MS)等统计指标。最终选取保留较高质量气候信息的RES年表作为分析对象[28]。

表1 采样点概况

Tab. 1 General situation of sampling sites

采样点	纬度	经度	海拔/m	样本(芯/树)	胸径(DBH)*	序列时段
HYP1	38°44′30″N	111°53′32″E	2303	48/24	47.73 ± 5.17	1926—2020年
HYP2	38°43′46″N	111°52′46″E	2477	46/23	39.17 ± 3.55	1914—2020年
HYP3	38°43′45″N	111°52′13″E	2539	40/20	42.25 ± 4.44	1924—2020年

注:*表示数据为平均值±标准误差。

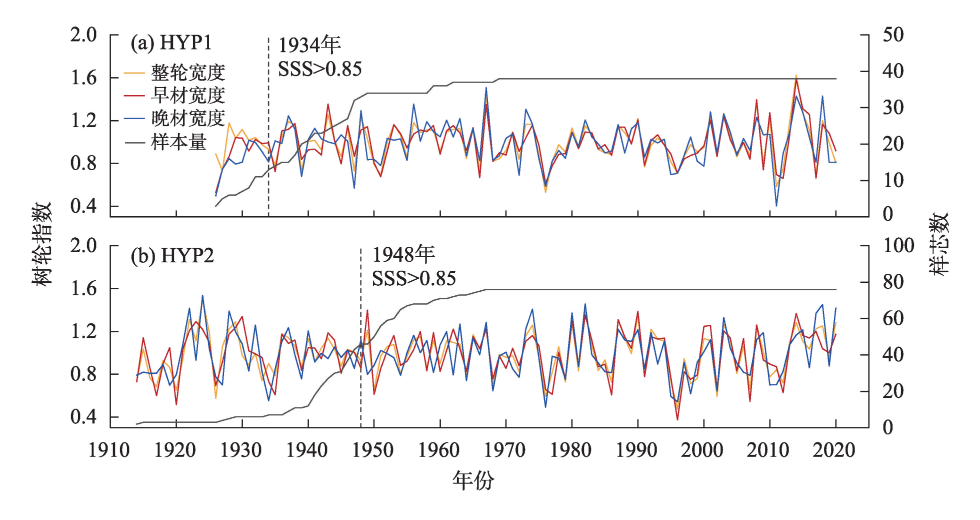


图3 芦芽山华北落叶松不同海拔的差值年表

Fig. 3 Residual chronology of *Larix principis-rupprechtii* at different altitudes in Luya Mountain

1.5 分析方法

采用独立样本t检验的方法，分析研究区平均气温、降水量的年际变化趋势，在1984年后温度快速升高，据此研究区年平均温度可以分为气温降低(1957—1984年)与气温升高(1985—2020年)2个阶段。首先，分别以1957—1984年和1985—2020年为公共区间，考虑到气候因子对树木的生长具有一定的"滞后效应"[29]，对3个海拔华北落叶松的整轮、早材、晚材宽度年表分别与上一年9月到当年10月平均气温、降水量的逐月气候因子进行Pearson相关分析；其次，对与早材和晚材径向生长密切相关的气候要素进行滑动相关分析，研究重要气候因子对树木早材和晚材生长在1957—2020年时段的动态变化影响。Pearson相关系数的计算在SPSS中完成，滑动相关系数通过DendroClim2002计算完成，滑动窗口为20 a。分离效应的判断方法主要参考高娜等[9]对秦岭牛背梁巴山冷杉和李宗善等[7]对川西卧龙地区岷江冷杉的有关树轮-气候分离研究中的判断方法，即通过对树轮年表与气候因子在研究时段(1957—2020年)的波动特征与差值的变化趋势，相关分析结果进一步验证，判断树木早晚材在研究时段的径向生长变化与该地区的气候变暖趋势是否拟合，分析探讨是否发生了分离效应。

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

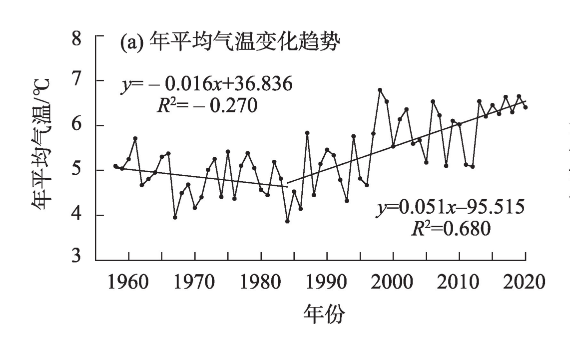
由图4可知，1984年和1971年达到研究时段1957—2020年的最低年平均温度3.9 ℃与最低年降水量276.1 mm，通过独立样本t检验的方法，分别比较1957—1984年与1985—2020年年平均气温、1957—1972年与1973—2020年年降水量之间的差异，结果表明年降水量变化在2个时段内未通过显著性检验($P>0.05$)；气温变化在2个时段存在显著差异($P<0.05$)，即研究区年平均气温在1957—1984年呈下降趋势，在1985—2020年呈上升趋势，表明该地区在20世纪90年代表现出明显的升温现象，尤其在1990年以后上升趋势更加明显。这与全球气候变暖背景下，张文涛等[20]对芦芽山气温变化的分析结果相一致，认为研究区年平均气温以1984年为界分为2个阶段，即1957—1983年气温降低阶段和1984—2007年气温升高阶段，年降水量并未表现出分段变化趋势。研究区年平均温度可以分为气温降低1957—1984年与气温升高1985—2020年2个阶段。

2.2 树木早晚材年表的基本统计特征分析

由表2可知，低海拔与中高海拔华北落叶松整轮、早材和晚材宽度年表的平均敏感度(MS)介于0.196~0.251，序列间相关系数(R)为0.509~0.896，标准差(SD)在0.175~0.230之间，第一主成分的解释量(PCA1%)达到53.7%~88.9%，表明3个采样点树木生长对气候的变化具有一定的敏感性。从样本总体代表性(EPS)和信噪比(SNR)指标来看，6个年表的样本总体解释量在0.958~0.989，均大于最低阈值0.850[30]，证明研究区6个年表均包含了一定气候信号，用来分析与区域气候因子响应均为可靠的数据。另外，中高海拔年表的样本总体解释量与信噪比指数均略高于低海拔宽度年表，表明芦芽山华北落叶松中高海拔树轮宽度年表包含的气候信息较低海拔年表更多。

2.3 树轮指数与气候因子的波动特征比较

基于芦芽山地区过去64 a平均气温和降水量变化情况可知，以1984年/1985年为分界点，将研究时



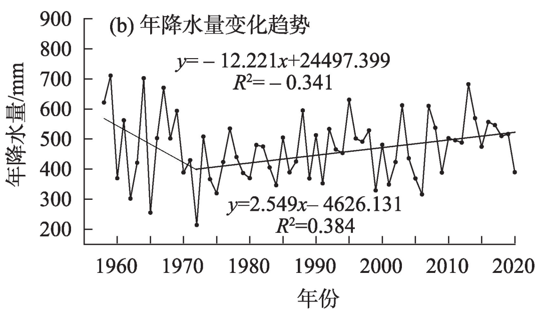


图4 1957—2020年研究区年平均气温与年降水量的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of annual average temperature and annual precipitation in the study area from 1957 to 2020

表2　各采样点早材与晚材树轮年表1957—2020年公共区间特征的比较

Tab. 2　Comparisons of common interval characteristics of tree-ring chronologies of early wood and late wood at different sites in 1957-2020

树轮年表	*R*	MS	SD	SNR	EPS	PCA1%
RW1	0.896	0.196	0.175	31.756	0.969	88.9
EW1	0.572	0.201	0.187	28.622	0.966	56.6
LW1	0.543	0.225	0.203	22.597	0.958	53.7
RW2	0.684	0.238	0.208	87.072	0.989	67.7
EW2	0.533	0.250	0.220	88.764	0.989	62.3
LW2	0.509	0.251	0.230	55.392	0.982	65.5

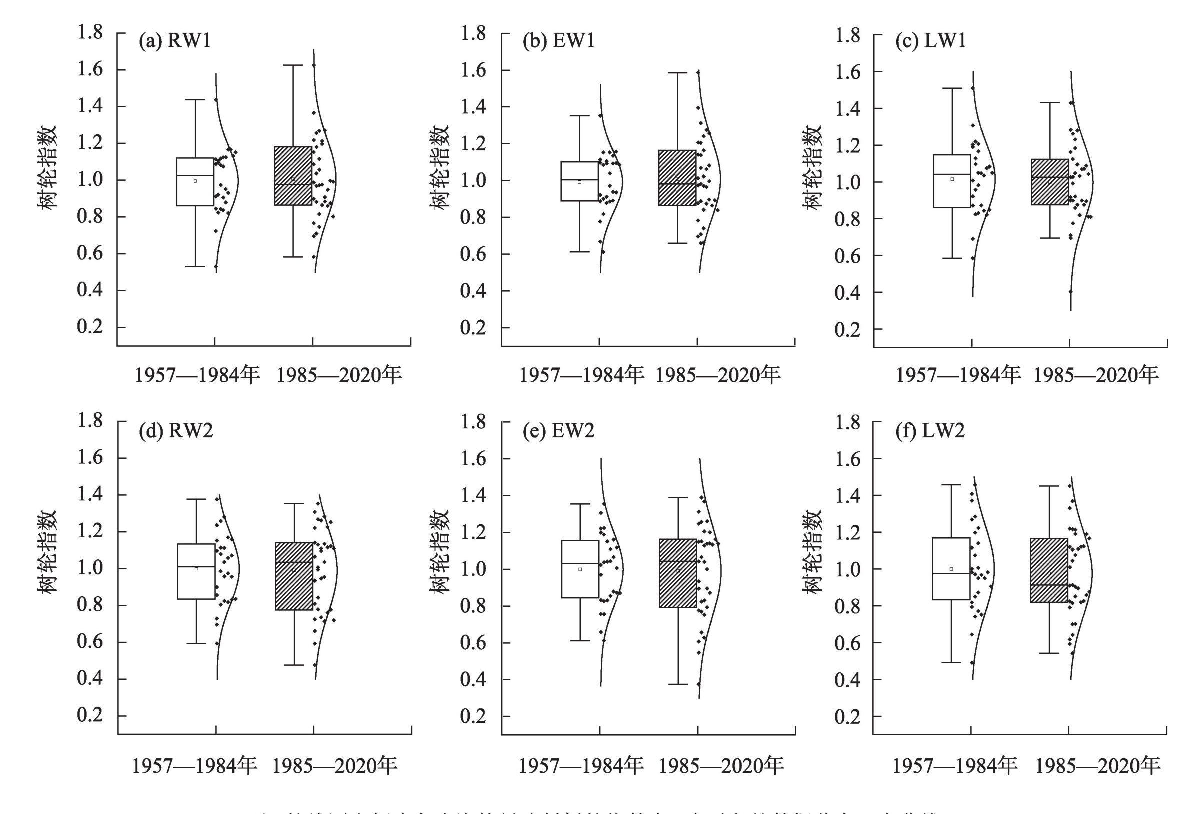
注:*R*表示序列间相关系数;MS表示平均敏感度;SD表示标准差;SNR表示信噪比;EPS表示样本总体代表性;PCA1%表示第一主成分解释量。

段分为1957—1984年和1985—2020年2个阶段。

从树轮指数在2个时段的箱线图特征来看(图5),在树轮指数数值方面,研究区华北落叶松整轮指数与早材指数在1985—2020年均稍高于1957—1984年;晚材指数前一时段稍高于后一时段,华北落叶松树轮早晚材指数在1957—1984年和1985—2020年时段均未表现出显著差异(F_{RW1}=0.627,F_{EW1}=1.683, F_{LW1}=0.209, F_{RW2}=1.903, F_{EW2}=2.616, F_{LW2}=0.491,P>0.05);从波动幅度特征来看,低海拔与中高海拔整轮、早材指数在1985—2020年的波动幅度均大于1957—1984年,而晚材在前一时段的波动幅度大于后一时段。

从气象站平均气温和降水量指标来看(图6),1985—2020年平均气温极显著高于1957—1984年(F=8.982,P<0.01),前一时段波动幅度小于后一时段。降水量在2个时段未表现出显著差异(F=3.334,P>0.05),且在前一时段的波动较大。

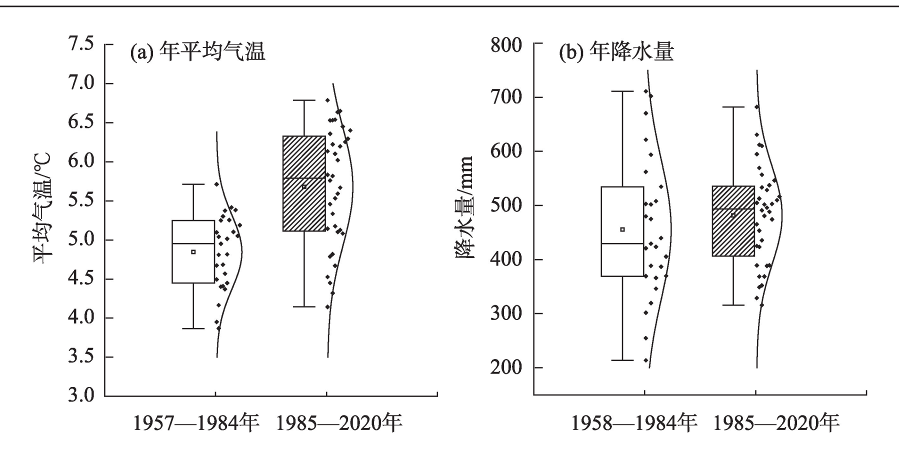
由此可见,在1957—1984年,低海拔与中高海拔华北落叶松早材树轮指数较小,气温指标偏低,波动较小;而在后一时段,树轮指数较大,波动幅度



注:箱线图右侧为各个海拔早晚材树轮指数在2个时段的数据分布正态曲线。

图5　树轮指数在1957—1984年和1985—2020年2个时段的箱线图

Fig. 5　Boxplots of tree-ring chronology during the two study periods in 1957-1984 and 1985-2020



注：箱线图右侧为气候要素在2个时段的数据分布正态曲线。

图6 气候要素在1957—1984年和1985—2020年2个时段的箱线图

Fig. 6 Boxplots of climatic variables in 1957-1984 and 1985-2020

较1957—1984年大，气候特征主要表现为气温增加趋势明显，2个时段气温差异达到极显著水平，降水量差异不明显。而3个海拔的晚材树轮指数表现为在1957—1984年，晚材树轮指数较高，波动幅度较大，在1985—2020年指数偏低，波动幅度较前一时段更加稳定。

从过去64 a树轮指数与气候因子的变化趋势来看(图7)，低海拔、中高海拔标准化早晚材年表序列与标准化年平均气温因子序列的差值，在整个研究时段呈扩大趋势，在1984年之后的气温快速上升时期，这种扩大趋势更加明显，且随着气温的升高，年平均气温数值高于树轮指数数值，树木早材和晚材在研究时段的径向生长变化与该地区的气候变暖趋势难以拟合，3个海拔早材和晚材树轮指数与年平均气温在1957—2020年时段发生了分离。降水量与研究区华北落叶松早材和晚材树轮指数的差值在整个时段较为平稳，即树轮指数与降水量在整个研究时段的拟合较好。

2.4 树木早晚材径向生长与气候因子的相关关系

从图8来看，在1957—1984年，研究区华北落叶松树轮宽度年表与月平均气温未表现出显著的相关关系；RW1、EW1年表与降水因子未表现出显著的相关关系，当年5月降水量促进低海拔树木晚材的径向生长，RW2、LW2宽度年表与当年5月降水量表现出显著的正相关关系，中高海拔早材宽度年表与当年6月降水量表现出显著的负相关关系，即中高海拔早材生长主要受到6月降水量的限制作用。综上所述，在1957—1984年气温降低时段，低海拔与中高海拔华北落叶松树木晚材生长与气候因子的响应模式较为一致，而气候因子对两者早材生长的限制作用存在一定差异，分离早晚材能够提取到不同的气候信号。

随着研究区气温的变化，不同海拔华北落叶松早材和晚材的生长与月份气候因子的关系发生了变化(图9a)。进入到1985—2020年的气温升高阶段，低海拔和中高海拔树木早材生长与月平均气温的相关关系较弱，均未通过显著性检验；低海拔树木晚材的生长受到上一年11月平均气温的抑制作用。另外，RW1、LW1宽度年表与当年3月平均气温呈正相关，LW2年表与当年5月平均气温呈显著正相关关系。在与降水因子的相关关系方面(图9b)，除RW1、EW1年表与4月降水量显著正相关外，3个海拔的其他早晚材年表均表现出与1月降水量的正相关关系，具有较高的一致性。

根据3个海拔树木与气候因子在1985—2020年的相关关系结果可以发现，随着气候的变化，生长季降水量(4月)对低海拔华北落叶松早材的生长影响增强，生长季降水对中海拔和高海拔早材生长的限制作用减弱，晚材生长前气候因子对树木晚材生长的限制作用增强，且上一年冬季降水(1月)的3个采样点树木生长的影响显著增强。

2.5 树木早晚材径向生长与主要气候因子的动态关系

综上所述，在1957—1984年，树木生长与气候因子的响应主要表现为6月降水量与中高海拔早材宽度的显著负相关，进入气温升高时段，主要表现

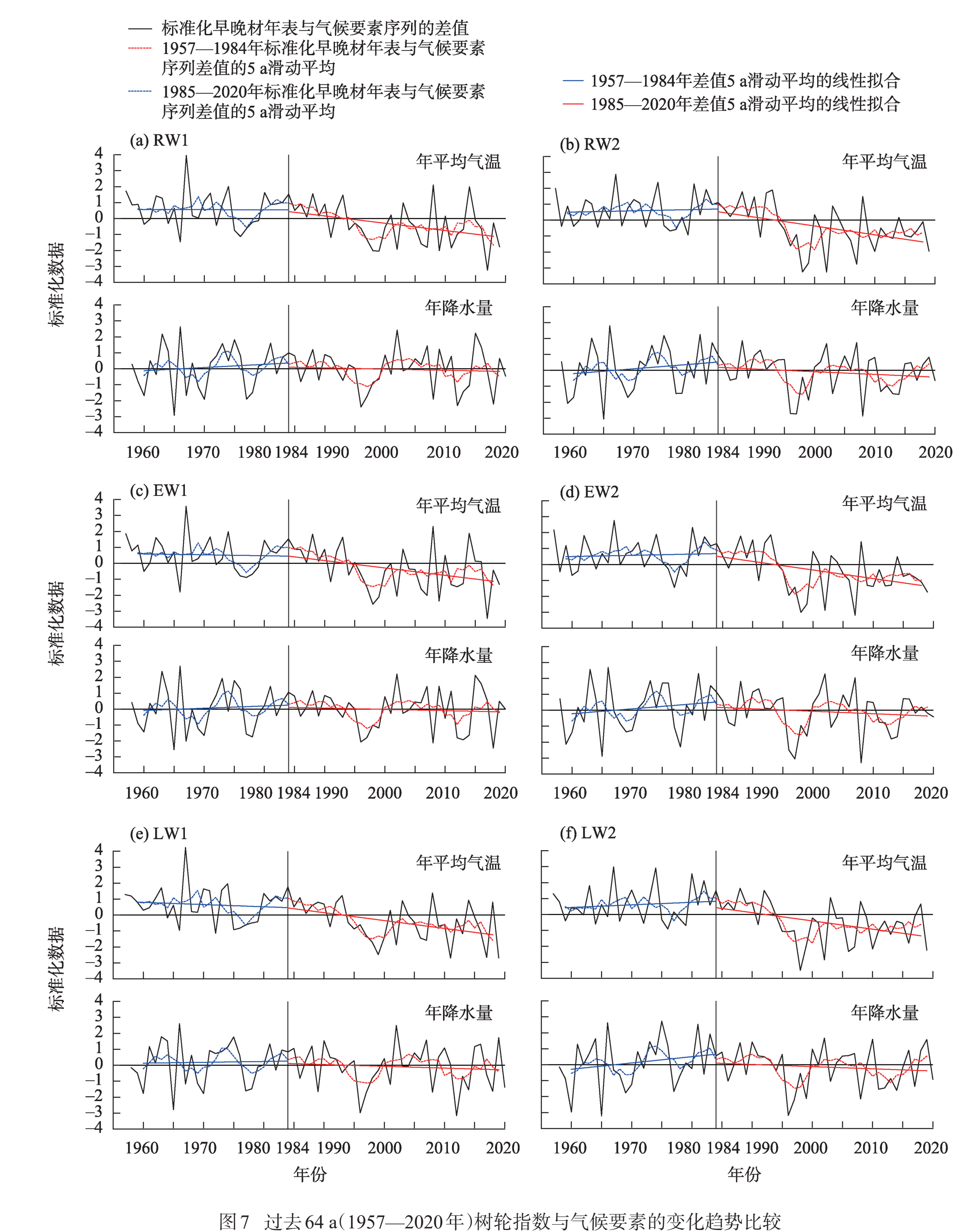


图7　过去64 a(1957—2020年)树轮指数与气候要素的变化趋势比较

Fig. 7　Variation tendency of tree-ring index and climate variables during the past 63 years (1957-2020)

为4月降水量对低海拔早材的生长限制作用,因此为进一步分析树木生长期间主要气候因子对树木早材的生长影响在1957—2020年时段的动态变化,选取当年4月、6月的平均气温和降水量与树木早材宽度年表进行向前滑动相关分析;另外,由于3个海拔晚材未表现出与其生长时期气候因子(8—10月)的相关关系,因此为进一步分析树木生长期间主要气候因子对树木晚材的生长影响在1957—2020年时段的动态变化,选取晚材生长时期气候因子,即9月和10月平均气温、降水量与树木晚材宽度年表进

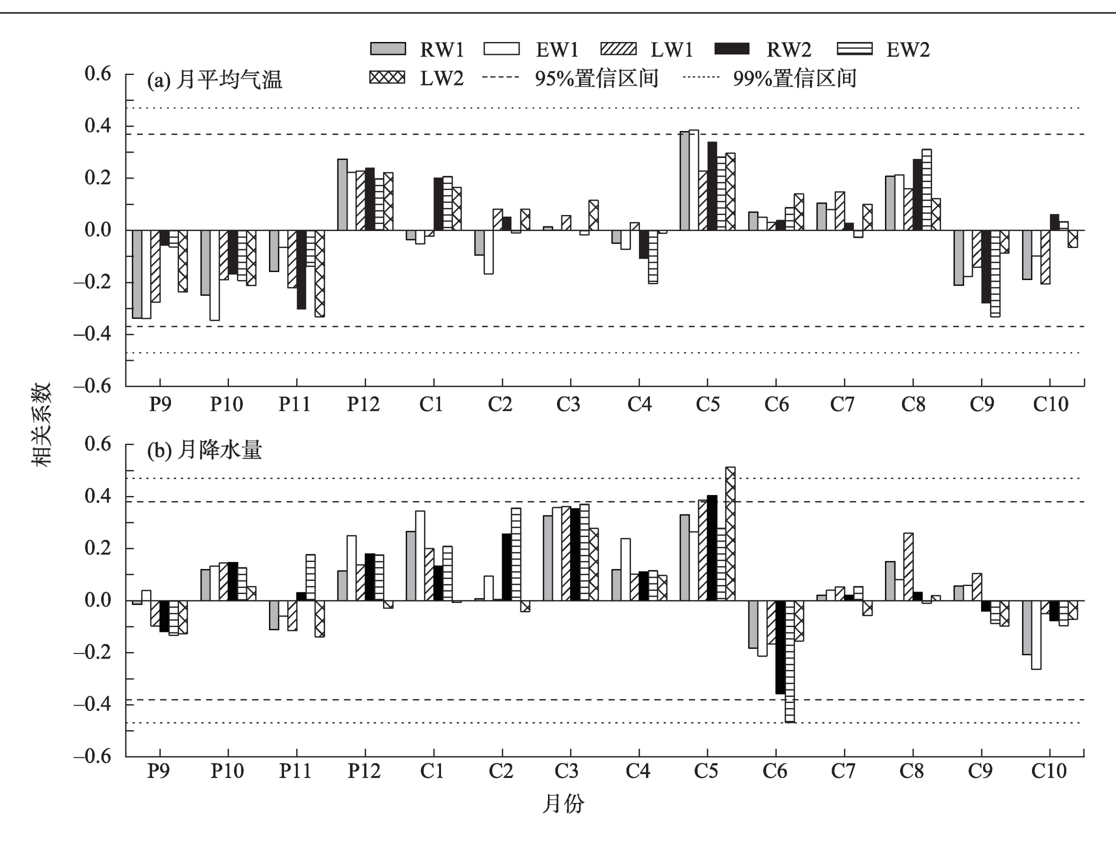


图8 1957—1984年树轮早晚材年表与月平均气温和月降水量的相关性分析

Fig. 8 Correlations between tree ring early and late wood chronology and monthly average temperature and monthly precipitation from 1957 to 1984

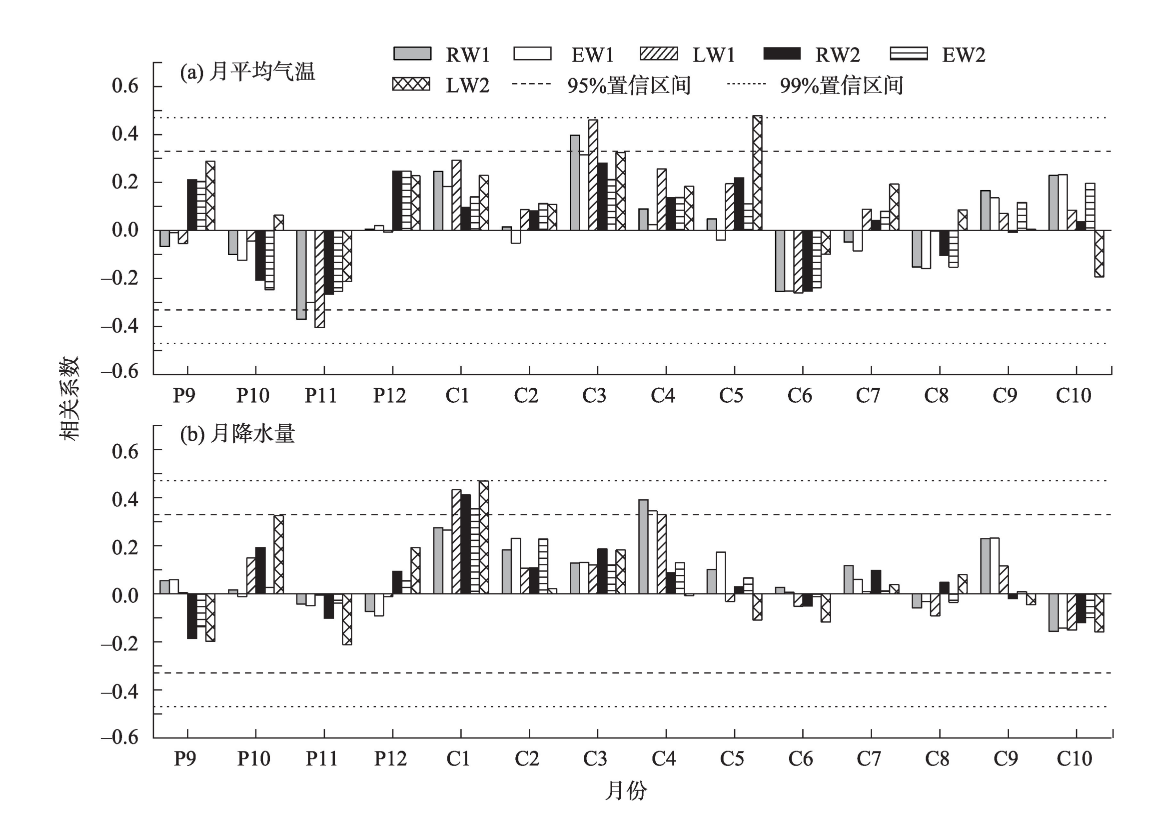


图9 1985—2020年树轮早晚材年表与月平均气温和月降水量的相关性分析

Fig. 9 Correlations between tree ring early and late wood chronology and monthly average temperature and monthly precipitation from 1985 to 2020

行向前滑动相关分析,滑动窗口均为20 a。

2.5.1　早材径向生长与主要气候因子的动态关系

由滑动分析结果可知(图10),华北落叶松早材宽度年表与4月平均温度的相关性在整个研究区间均未通过显著性检验,与中高海拔相比,低海拔早材在后期表现出一定程度的下降趋势;与4月降水量的相关关系在整个研究时段经历了较大的波动,总体呈现出先上升后下降,在2008年后又波动上升的趋势,且低海拔早材与4月降水量的相关性在2016—2020年通过了显著性检验,呈显著正相关关系。

研究区华北落叶松早材径向生长与6月平均气温的相关关系在1957—2020年整体呈现出波动下降的趋势,在2015—2020年表现出显著负相关关系;在研究时段早期,6月降水量与中高海拔早材宽度年表呈现出显著负相关关系,对早材生长具有很明显的抑制作用,而在1985—2020年呈波动上升趋势,随着温度的升高,6月降水量与中高海拔较强的负相关关系向不显著相关关系变化,与低海拔早材的相关关系在研究时段呈现出上升的趋势,均未通过显著性检验。

2.5.2　晚材径向生长与主要气候因子的动态关系

由月气候因子与树轮宽度年表的相关分析结果可知,低海拔与中高海拔晚材径向生长与9月、10月平均气温和降水量之间的相关性较弱,均未通过显著性检验。从滑动分析结果来看(图11),研究区树木晚材整体上与当年9月平均气温以及10月平均气温和降水量的相关关系在1957—2020年均未通过显著性检验,在研究区间变化趋势相对一致,与9月平均气温在研究区间波动上升,与10月平均气温呈现出先升高后波动下降的趋势;与10月降水量在研究区间表现出先上升后波动下降的趋势,与9月降水量呈现出先下降后上升的趋势,在研究时段后期2016—2020年表现出显著正相关关系。

3　讨论

3.1　不同海拔华北落叶松早晚材径向生长与气候因子响应关系的变化

综上所述,在1957—2020年,树木径向生长与气候因子的响应模式在不同海拔以及早晚材均表现出一定的差异,芦芽山华北落叶松早晚材径向生长与气候变暖趋势难以拟合,存在一定的"分离现象"。首先,在1957—1984年,低海拔早材与气候因子相关关系较弱,均未通过显著性检验,而降水量

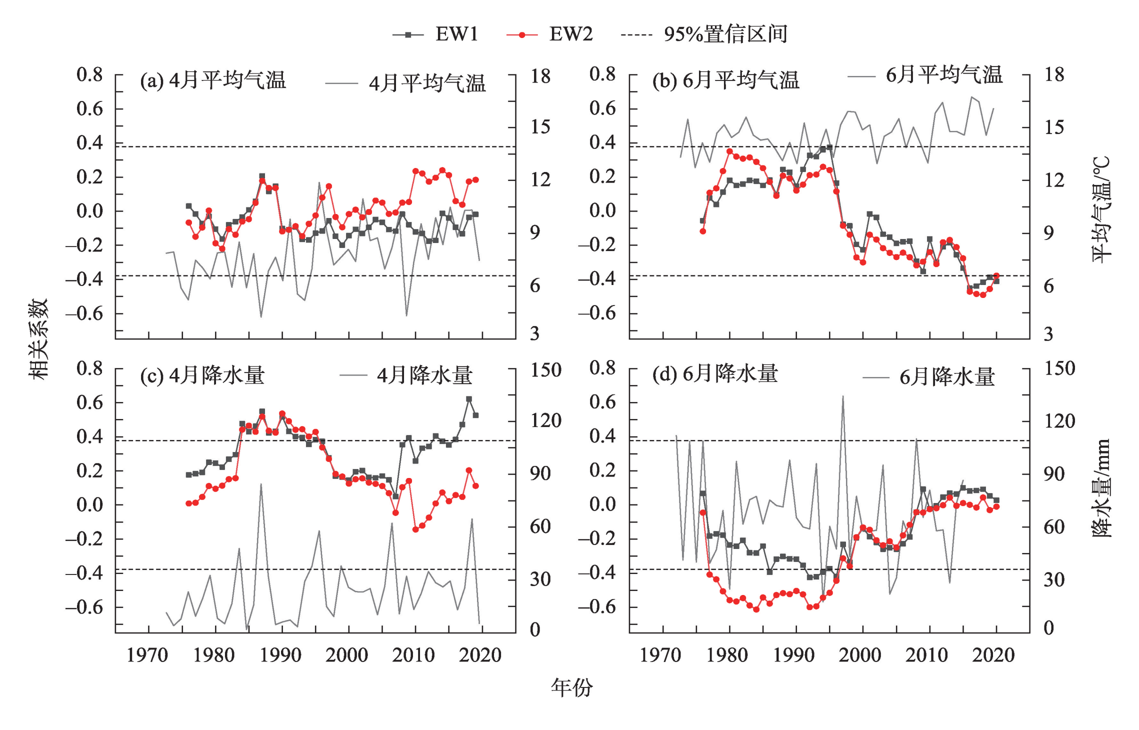


图10　不同采样点早材年表与主要气候因子之间的向前滑动相关分析

Fig. 10　Correlation analysis of forward evolutionary intervals between chronology of early wood at different sampling points and main climatic factors

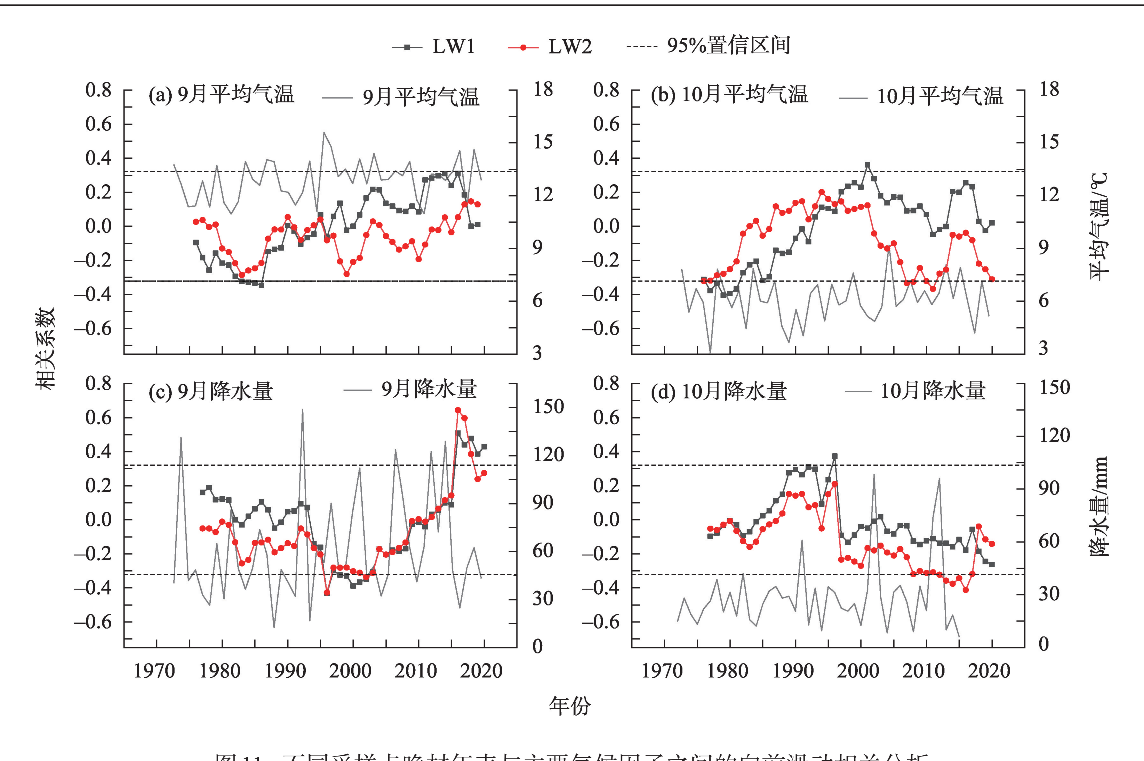


图11 不同采样点晚材年表与主要气候因子之间的向前滑动相关分析

Fig. 11 Correlation analysis of forward evolutionary intervals between chronology of late wood at different sampling points and main climatic factors

对中高海拔早材生长的限制作用较强,这是因为在中高海拔地区生长季降水量过多,气温降低,加上阴雨天气云量增加导致树木接受的太阳辐射减弱,致使树木光合作用效率降低,从而不利于中高海拔地区树木早材的生长。6月降水量对中高海拔早材的生长抑制作用在某种程度上也是低温限制的间接体现,这一结果也已体现在其他学者对整轮和早材与气候变化响应的研究中[12,31-32],且与张文涛等[22]对这一地区华北落叶松整轮宽度年表与气候因子响应的研究结果基本一致。进入1985—2020年气温升高阶段,生长季气候因子对低海拔早材限制作用增强,4月降水量表现出对低海拔早材生长的促进作用,随着气温的升高,降水及时补充土壤水分,有利于树木早材光合作用的进行[33-34]。中高海拔早材宽度年表未表现出与生长季气候因子的显著相关关系,对中高海拔早材的生长影响减弱。本研究结果与以往的"分离效应"结果类似[35-36],芦芽山高海拔华北落叶松树木生长对温度的敏感性下降,也就是说气候变暖使得生长季气候因子对中高海拔早材径向生长的限制作用减弱。同时,低海拔树木生长包含更多敏感性降水信号,随着气候变暖,土壤水分蒸发强度增大,土壤含水量降低,供给树木的水分减少。温度-降水共同限制树木径向生长逐渐取代温度对树木径向生长的单独限制,使树木径向生长对水分敏感性上升。

在1957—1984年,当年5月降水因子促进芦芽山树木晚材的生长,此时树木生长处于春季茎干水分恢复期(4月末—6月初),树木茎干组织水分严重欠缺,5月降水量使得土壤含水量增加,树木根部通过根压吸收补充水分,使得组织细胞水分及时达到平衡[37],而细胞膨压的恢复是树木良好生长不可缺少的前提条件[38-39],有利于积累树木晚材生长所需要的养分,不难发现在前一时段晚材生长前养分积累对树木晚材的生长至关重要。进入气温升高阶段,低海拔树木晚材的生长受到上一年11月平均气温的抑制作用,上一年11月温度越高,树木水分的蒸发作用越强烈,从而减少水分的储备,不利于树轮宽轮的形成以及树木晚材生长所需养分的储备[40]。上一年冬季降水量对3个海拔树木的早材和晚材生长影响增强,说明在后一时段,研究区中高海拔早材的生长受到上一年冬季降水量的限制作用,存在一定程度的滞后效应,且晚材的生长发育依旧依赖于生长前养分的积累。1月降水主要是雪的形式,在一定程度上减小了土壤热量的散发,并且能够阻

隔冷空气的入侵[41],另一方面,积雪能够增加土壤的水分含量,在树木的生长过程中水分缺乏时给予补偿[42],随着温度的升高,1月降雪能够及时融化,为下一年树木的生长萌发提供充足的水分。

3.2 气温升高对3个海拔树木早晚材生长的影响

滑动分析结果显示,低海拔早材与4月、6月平均气温的相关关系在气温升高时段均呈现出下降趋势,与4月降水量的相关关系在2008年后呈上升趋势,并且在2016—2020年达到显著正相关。树木生长与温度因子的显著负相关且伴随着与降水因子的显著正相关关系,一般被认为树木受到干旱胁迫的影响[43-45]。郑永宏等[46]发现,青海都兰不同生境的祁连圆柏与降水量由不相关到显著正相关的改变,表现出一定程度的土壤干旱胁迫。在本研究中,低海拔树木早材在整个研究时段的生长存在相似的影响机制,即生长季4月、6月温度与树木生长的相关关系在整个研究时段呈现出趋向于负相关关系,且4月降水量在气温升高阶段对低海拔早材生长的限制作用增强,表明温度持续升高可能会引发该地区树木的土壤干旱胁迫。滑动分析结果表明,低海拔早材生长模式的改变有可能是气温升高引起一定程度的干旱胁迫所导致的。

在1957—2020年,中高海拔早材与6月温度的正相关关系呈下降趋势,在1957—1984年时段,6月降水量对早材生长具有显著抑制作用,在1984年之后,随着温度的升高,早材与6月降水量的显著负相关向不相关变化。由早材生长与气候因子的相关分析结果可知,中高海拔早材生长在生长季受到低温抑制作用,而滑动分析结果显示,随着气候变化,中高海拔华北落叶松早材径向生长对6月温度和6月降水因子的敏感性下降,也就是说温度的升高缓解了海拔升高引起的气温下降,对中高海拔地区华北落叶松树木生长造成的影响,尤其是对早材生长的抑制作用,促进了高海拔树木的生长,这与赵学鹏[47]对长白落叶松以及张文涛等[22]对同一地区不同海拔白杄与气候变化响应的研究结果较为一致。

树木早材一般在春季与夏初生长,而晚材的生长时期为夏末与秋季[48],赵安玖等[49]研究发现,川西南柳晚材生长与秋季10月平均气温显著正相关,而由树木晚材-气候响应的相关分析与滑动分析结果可知,芦芽山华北落叶松3个采样点晚材与生长期8月、10月平均气温和降水量,9月平均气温的相关关系在1957—1984年和1985—2020年2个研究时段均未通过显著性检验,与9月降水量的相关关系仅在研究时段末期表现出显著正相关关系,表明随着气候变暖,晚材生长时期9月降水将会对树木晚材的生长限制作用增强。根据五寨气象站的气象资料,芦芽山在1957—2020年的11月平均气温均在0 ℃以下,此时树木几乎停止生长,由此可见,树木晚材生长时期气候对其生长未表现出较强的相关关系。由气候要素的相关分析结果可知,进入到气温升高阶段,树木晚材生长主要与当年3月、5月平均气温以及1月降水量显著相关,说明生长前期气候条件影响晚材的生长,且随着气候变化,对树木的影响增强。综上所述,芦芽山3个海拔华北落叶松晚材的生长所需的营养物质极有可能主要依赖于生长前期的养分积累,且这种依赖作用随着气候变化加剧。

4 结 论

本文研究了近63 a来气候变化对芦芽山国家自然保护区低海拔与中高海拔华北落叶松早材和晚材径向生长的影响,发现树轮指数与气候要素的波动特征、差值年表(RES)序列与气候要素之间的相关性在1957—1984年和1985—2020年这2个时段上均存在着差异,并在此基础上探讨了研究区温度升高对其树木早材和晚材的影响。

(1) 3个海拔华北落叶松早材和晚材树轮指数与年平均气温存在明显的分离现象,具体表现在20世纪90年代之后,全球气温变暖的背景下,两者之间的差值呈扩大趋势,尤其是在1990年之后的气温快速上升时期,扩大趋势更加明显,并且年平均气温数值高于树轮指数数值。

(2) 华北落叶松早材径向生长与气候因子在不同时段的响应模式发生了改变:在1957—1984年,低海拔早材宽度年表与气候因子未表现出显著的相关关系,当年6月降水量对中高海拔树木生长的限制性影响明显;在1985—2020年,低海拔早材宽度年表与4月降水量呈显著正相关关系,即在全球变暖的大趋势下,生长季降水因子对早材的生长影响增强,中高海拔早材宽度年表仅与1月降水量呈显著正相关关系,生长季气候因子对中高海拔早材生长发育的限制作用减弱。

（3）在1957—1984年，研究区3个海拔树木晚材宽度年表与5月降水量呈显著正相关关系，主要受到生长前降水因子的限制作用；进入气温升高阶段，3个海拔晚材年表综合表现出与上一年11月平均气温、当年1月降水量、3月和5月平均气温的显著相关关系，树木晚材生长持续受到生长前气候因子的限制作用。

（4）在2个不同的时段内，低海拔华北落叶松早材在2个时段生长模式的改变极有可能是气温升高带来的干旱胁迫造成的，而中高海拔早材的生长模式差异可能是由于气温升高缓解了中高海拔地区低温对早材生长的抑制作用，从而有利于中高海拔地区早材的生长；另外，芦芽山3个海拔华北落叶松晚材生长所需的营养物质主要依赖于生长前期的养分积累。

参考文献（References）：

[1] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. Science, 2008, 320: 1768–1771.

[2] Lindner M, Maroschek M, Netherer S, et al. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259: 698–709.

[3] Serreze M C, Walsh J E, Chapin F S, et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment[J]. Climatic Change, 2000, 46: 159–207.

[4] Andreu L, Gutiérrez E, Macias M, et al. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests[J]. Global Change Biology, 2010, 13: 804–815.

[5] Jacoby G C, D'Arrigo R D. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9: 227–234.

[6] William W D, Gregory C W, Rosanne D A, et al. Divergent tree growth response to recent climatic warming, Lake Clark National Park and Preserve, Alaska[J]. Geophycal Research Leters, 2005, 32: L20703.

[7] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 等. 川西卧龙国家级自然保护区树木生长对气候响应的时间稳定性评估[J]. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1045–1057. [Li Zongshan, Liu Guohua, Fu Bojie, et al. Evaluation of temporal stability in tree growth-climate response in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(9): 1045–1057.]

[8] 郭明明, 张远东, 王晓春, 等. 升温突变对川西马尔康树木生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7464–7474. [Guo Mingming, Zhang Yuandong, Wang Xiaochun, et al. Effects of abrupt warming on main conifer tree rings in Markang, Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7464–7474.]

[9] 高娜, 李书恒, 白红英, 等. 秦岭牛背梁自然保护区巴山冷杉树轮宽度对气候变化响应的分离效应[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2056–2065. [Gao Na, Li Shuheng, Bai Hongying, et al. Response divergence of *Abies fargesii* tree-ring widths to climate variation in the Niubeiliang Nature Reserve of the Qinling Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2056–2065.]

[10] 岳伟鹏, 陈峰, 袁玉江, 等. 气候变暖背景下云南西北部大果红杉径向生长衰退及其气候驱动因子分析[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 1–11. [Yue Weipeng, Chen Feng, Yuan Yujiang, et al. The decline in radial growth of *Larix potaninii* in Northwestern Yunnan and its driving factors under the background of climate warming[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 1–11.]

[11] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, et al. On the "divergence problem" in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes[J]. Global and Planetary Change, 2007, 60: 289–305.

[12] Zhao Y S, Shi J F, Shi S Y, et al. Tree-ring latewood width based July-August SPEI reconstruction in South China since 1888 and its possible connection with ENSO[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(1): 39–48.

[13] Yuan S, Zheng Y H, Wu S B, et al. March SST reconstruction in the South China Sea based on *Pinus massoniana* tree-ring widths from Changting, Fujian, in Southeast China since1893 CE[J]. Marine Micropaleontology, 2018, 145: 21–27.

[14] Zhao Y S, Shi J F, Shi S Y, et al. Early summer hydroclimatic signals are captured well by tree-ring earlywood width in the eastern Qinling Mountains, central China[J]. Climate of the Past, 2019, 15 (3): 1113–1131.

[15] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6743–6752. [Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. Contrastive analysis and climatic response of tree-ring gray values and tree-ring densities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6743–6752.]

[16] 陈晶晶, 李钢铁, 秦艳, 等. 浑善达克沙地榆树年轮结构对气候变化的响应[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 80–87. [Chen Jingjing, Li Gangtie, Qin Yan, et al. Response of tree-ring structure of *Ulmus pumila* var. *sabulosa* to climate change in the Otindag Sand Land[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 80–87.]

[17] Fonti P, Babushkina E A. Tracheid anatomical responses to climate in a forest-steppe in southern Siberia[J]. Dendrochronology, 2016, 39: 32–41.

[18] Chen F, Mary H G, Zhang H L, et al. Warm season temperature in the Qinling Mountains (north-central China) since 1740 CE recorded by tree-ring maximum latewood density of *Shensi fir*[J]. Climate Dynamics, 2021, 57: 2653–2667.

[19] Liu Y X, Yan J H, Wu T W, et al. Prediction research of climate change trends over North China in the future 30 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 22(1): 42–50.

[20] 张文涛, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山阳坡不同海拔白杆径向生长对气候变暖的响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(12): 1142−1152. [Zhang Wentao, Jiang Yuan, Wang Mingchang, et al. Responses of radial growth to climate warming in *Picea meyeri* trees growing at different elevations on the southern slope of Luya Mountain[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(12): 1142−1152.]

[21] 李颖俊, 王尚义, 牛俊杰, 等. 芦芽山华北落叶松树轮宽度年表对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1608−1618. [Li Yingjun, Wang Shangyi, Niu Junjie, et al. Climate-radial growth relationship of *Larix principis-upprechtii* at different altitudes on Luya Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): 1608−1618.]

[22] 张文涛, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6481−6488. [Zhang Wentao, Jiang Yuan, Wang Mingchang, et al. Responses of radial growth in *Larix principis-rupprechtii* to climate change along an elevation gradient on the southern slope of Luya Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6481−6488.]

[23] 易亮, 刘禹, 宋慧明, 等. 山西芦芽山地区树木年轮记录的1676AD以来5—7月温度变化[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 330−336. [Yi Liang, Liu Yu, Song Huiming, et al. Summer temperature variations since 1676AD in Luya Mountain, Shanxi Province of China, inferred from tree rings[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 330−336.]

[24] 张金屯. 山西芦芽山植被垂直带的划分[J]. 地理科学, 1989, 9(4): 346−353. [Zhang Jintun. Vertical zones of vegetation in Luya Mountain in Shanxi Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 1989, 9(4): 346−353.]

[25] Stocks M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1986.

[26] Stahle D W, Cleaveland M K, Grissino-Mayer H D, et al. Cool- and warm-season precipitation reconstructions over western New Mexi [J]. Journal of Climate, 2009, 22(13): 3729−3750.

[27] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69−78.

[28] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报, 1994, 49(2): 174−181. [Shao Xuemei, Wu Xiangding. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* franch from Huashan, China[J]. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(2): 174−181.]

[29] 李江风, 袁玉江, 由希尧. 树木年轮水文学研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [Li Jiangfeng, Yuan Yujiang, You Xiyao. Research and Application of Tree Ring Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2000.]

[30] Wigley T W L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. Journal of Climate Applied Meteorology, 1984, 23: 201−213.

[31] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 阿尼玛卿山地祁连圆柏径向生长对气候的响应[J]. 地理学报, 2007, 62(7): 742−752. [Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu, et al. Horizontal variations of climatic response of Qilian juniper (*Juniperus przewalskii*) in the Anyemaqen Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 742−752.]

[32] 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 等. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 863−870. [Zhu Haifeng, Wang Lili, Shao Xuemei, et al. Tree ring-width response of *Picea schrenkiana* to climate change[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 863−870.]

[33] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 27−34. [Gao Lushuang, Wang Xiaoming, Zhao Xiuhai. Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(1): 27−34.]

[34] 陈列, 高露双, 张赟, 等. 长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1285−1291. [Chen Lie, Gao Lushuang, Zhang Yun, et al. Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1285−1291.]

[35] 薛儒鸿, 焦亮, 刘小萍, 等. 新疆阿尔泰山不同海拔西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的响应稳定性评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1275−1284. [Xue Ruhong, Jiao Liang, Liu Xiaoping, et al. Evaluation of the stability of the radial growth of *Larix sibirica* at different altitudes in response to climate change in Altai Mountains, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(5): 1275−1284.]

[36] 盖学瑞, 于大炮, 王守乐, 等, 树轮−气候"分异问题"形成机制的研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3273−3280. [Gai Xuerui, Yu Dapao, Wang Shoule, et al. A review of formation mechanism on the divergence problem of tree growth-climate relationship[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11): 3273−3280.]

[37] 董满宇, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7430−7439. [Dong Manyu, Jiang Yuan, Wang Mingchang, et al. Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7430−7439.]

[38] Kozlowski T T, Pallardy S G. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses[J]. Botanical Review, 2002, 68(2): 270−274.

[39] Zweifel R, Zimmermann L, Zeugin F, et al. Intra-annual radial growth and water relations of trees: Implications towards a growth mechanism[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(6): 1445−1459.

[40] 王亚军, 勾晓华, 刘普幸, 等. 甘肃榆中200年来春季气温的变化[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 283−285. [Wang Yajun, Gou Xiao-

hua, Liu Puxing, et al. Change of spring temperature in Yuzhong of Gansu Province during recent 200 years[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 283–285.]

[41] 吴燕良, 甘淼, 于瑞德. 天山东部西伯利亚落叶松径向生长对气候的响应及其物候模拟[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(6): 1301–1311. [Wu Yanliang, Gan Miao, Yu Ruide. Effect of climate on the radial growth of *Larix sibirica* and its phenological features in the eastern Tianshan Mountains[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(6): 1301–1311.]

[42] 李江风, 袁玉江. 雪在年轮生长中的作用[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 1984 (2): 85–92. [Li Jiangfeng, Yuan Yujiang. Affect of snow in the tree-ring[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 1984 (2): 85–92.]

[43] Fritts H C, Smith D G, Stokes M A. The biological model for paleoclimatic interpretation of Mesa Verde tree-ring series[J]. American Antiquity, 1965, 31(2): 101–121.

[44] 张志华, 吴祥定, 李骥. 利用树木年轮资料重建新疆东天山300多年来干旱日数的变化[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 53–60. [Zhang Zhihua, Wu Xiangding, Li Ji. Utilizing tree ring chronologies to reconstruct 300-year drought days in eastern Tianshan Mountains[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1996, 7 (1): 53–60.]

[45] 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2004, 34(2): 145–153. [Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin, et al. Changes of millennium precipitation recorded by tree rings in Delingha area, Qinghai Province[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2004, 34(2): 145–153.]

[46] 郑永宏, 梁尔源, 朱海峰, 等. 不同生境祁连圆柏径向生长对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 7–12. [Zheng Yonghong, Liang Eryuan, Zhu Haifeng, et al. Response of radial growth of Qilian juniper to climatic change under different habitats[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(3): 7–12.]

[47] 赵学鹏, 白学平, 李俊霞, 等. 气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 637–647. [Zhao Xuepeng, Bai Xueping, Li Junxia, et al. Response of *Larix olgensis* at different elevations to climate change in the context of climate warming[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 637–647.]

[48] 郭明辉, 赵西平. 木材气候学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [Guo Minghui, Zhao Xiping. Introduction to Wood Climatology[M]. Beijing: Science Press, 2009.]

[49] 赵安玖, 郭世刚, 杨旭, 等. 川西南柳杉早材、晚材年表与温度和降雨的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1603–1609. [Zhao Anjiu, Guo Shigang, Yang Xu, et al. Relationship between radial growth of earlywood, latewood of *Cryptomeria fortune* with temperature and precipitation change in southwest Sichuan Province, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1603–1609.]

Response divergence of radial growth to climate change in earlywood and latewood of *Larix principis-rupprechtii* in Luya Mountain

GUO Yili[1,2], LI Shuheng[1,2], WANG Jiachuan[1,2], HAN Yijie[1,2]

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the annual ring cores of *Larix principis-rupprechtii* collected from three altitudes of Luya Mountain, the residual chronology of earlywood and latewood tree rings was established. Using the method of tree ring climatology and taking 1984/1985 as the boundary, heterogeneity characteristics of radial growth of earlywood and latewood of *L. principis-rupprechtii* at different altitudes in response to climate factors in 1957–1984 and 1985–2020 were discussed. The results showed that the following: (1) the radial growth changes of earlywood and latewood were difficult to fit the climate warming trend in the study area from 1957 to 2020, and the response to temperature is separated. (2) From 1957 to 1984, no significant correlation existed between low altitude and climate factors in the growth of earlywood. Precipitation during the growing season, which had a significant positive correlation with precipitation in March and negative correlation in June, had an obvious restrictive effect on the growth of earlywood at medium and high altitudes. The precipitation factors in the growing season from 1985 to 2020 had a significant positive correlation with precipitation in April and had an influence on the growth of earlywood at a low altitude, thereby enhancing it. The growth of earlywood at medium and high altitudes was mainly affected by precipitation in January, and the restrictive effect on the growth and development of earlywood at medium and high altitudes was weakened. (3) Nutrient accumulation before growth is very important for latewood growth of *L. principis- rupprechtii*: from 1957 to 1984. The chronology of latewood width at three altitudes showed a significant positive correlation with precipitation in May. From 1985 to 2020, the radial growth of tree latewood was limited by the comprehensive factors of temperature and precipitation before growth in November of the previous year and January, March, and May of the current year. (4) In two different time periods, the change of the pattern of earlywood growth at a low altitude may have been caused by drought stress, which was caused by increased temperatures. The difference in the growth patterns of earlywood at medium and high altitudes was most likely due to the fact that the increased temperature alleviated the inhibitory effect of low temperature on the growth of earlywood at medium and high altitudes. With global warming, there are different response characteristics and response modes of earlywood and latewood of *L. principis-rupprechtii* of three altitudes of Luya Mountain to climate factors in two time periods. There is a certain "response divergence" phenomenon with the response of climate factors that should be considered concerning future climate reconstruction in this area.

Keywords: Luya Mountain; *Larix principis- rupprechtii*; elevation gradient; earlywood ring width; latewood ring width; climate change; response divergence